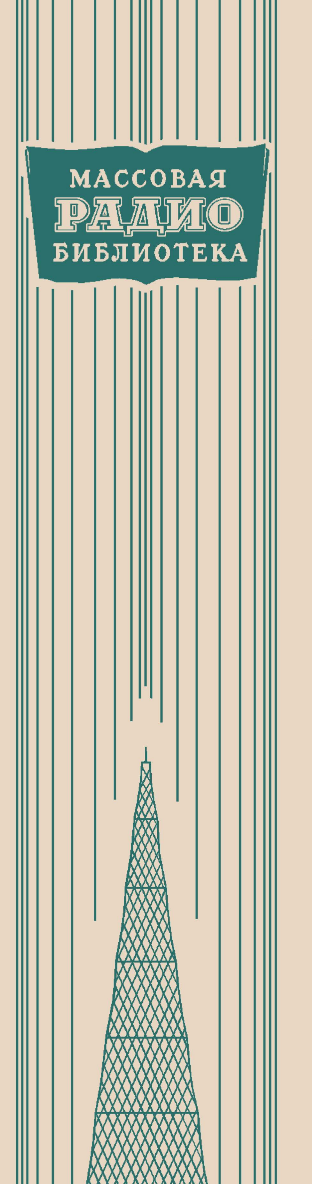


М. Е. ЖАБОТИНСКИЙ

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ





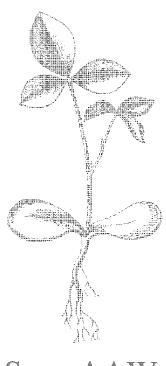
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 311

М. Е. ЖАБОТИНСКИЙ

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

В брошюре, рассчитанной на подготовленных радиолюбителей и лиц, интересующихся развитием нового раздела радиоэлектроники — квантовой радиотехникой, в популярной форме изложены принципы устройства и применения молекулярных генераторов и усилителей.

СОДЕРЖАНИЕ

Жаботинский Марк Ефремович

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ

Редактор *П. О. Чечик* Техн. радактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 6/IX 1958 г. Подписано к печати 20/XI 1958 г.
Т-11541. Бумага 84×108 1/32. 2,46 печ. л. Уч.-изд. л. 2,7
Тираж 35 000 экз. Цена 1 р. 10 к. Заказ 1406

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

ВВЕДЕНИЕ

Потребности практики выдвигают перед наукой все более и более сложные задачи. В свою очередь развитие техники дает ученым возможность вести исследования в областях, ранее казавшихся недоступными, и внедрять в практику результаты весьма, казалось бы, абстрактных исследований.

Здесь будут освещены лишь две из задач, стоящих сейчас перед наукой: получение электрических колебаний с чрезвычайно стабильной частотой и создание устройств, способных регистрировать предельно слабые электромагнитные колебания.

Как возникли эти задачи?

Первая из них уходит своими корнями в далекое прошлое, так как, по существу, она совпадает с задачей измерения времени. В древности ее решали при помощи песочных часов, иногда применяемых еще и в наши дни для грубых измерений. А водяные часы-клепсидры сохранились вплоть до средневековья, когда они были вытеснены часами с гирями. Первые механические часы были весьма грубыми устройствами, ход которых сильно зависел от температуры окружающей среды, качества смазки, износа подшипников и многих других причин.

Лишь наблюдения великого Галилея, подробно изучившего закон качания маятника, позволили предложить конструкцию маятниковых часов. Такие часы создал крупнейший ученый XVII в. голландец Гюйгенс. Он же изобрел и часы с балансиром — прототип современных наручных часов и морских хронометров. Но и самые совершенные современные маятниковые часы с электрическим приводом, применяемые в службах времени (часы Шорта), лучшие экземпляры которых обладают вариацией суточного хода 0,003 *сек*, не могут уже удовлетворить возрастающие

потребности астрономии. Крупным недостатком маятниковых часов является их чувствительность к толчкам и сотрясениям, а также и к изменениям температуры и давления окружающей среды.

На смену механическим, маятниковым часам пришли так называемые кварцевые часы — детище радиотехники конца двадцатых годов XX в. Вариация суточного хода современных кварцевых часов равна лишь десятитысячной доле секунды. Астрономы при помощи кварцевых часов обнаружили неравномерность суточного вращения Земли и тем поставили под сомнение пригодность этого извечного эталона времени.

Но жизнь выдвинула новые, еще более высокие требования. Создание радионавигационных систем для вождения судов и самолетов, которые обеспечили бы безопасность движения современного скоростного воздушного и морского транспорта, потребовало дальнейшего увеличения точности хода часов. Ряд других областей науки и техники тоже остро нуждается в более совершенных эталонах времени.

Теперь уже ясно, что дальнейшее повышение точности измерения времени требует отказа от применения приборов, основанных на колебаниях таких тел, как маятник или кварцевая пластина. Эти макроскопические (т. е. имеющие сравнительно крупные размеры) тела состоят из огромного числа атомов и могут испытывать неконтролируемые случайные малые изменения размеров, приводящие к изменениям периода колебаний. Более совершенные эталоны могут быть построены лишь на основе микросистем — атомов и молекул, состоящих из немногих элементарных частиц. Эти системы подчиняются квантовым законам, т. е. не могут испытывать сколь угодно малых изменений их свойств. Другими словами, эти системы не могут претерпевать плавных изменений, а способны изменяться лишь скачками. Вследствие этого микросистемы обладают характерной внутренней устойчивостью, что и может быть использовано при создании новых эталонов.

Вторая задача — задача повышения чувствительности радиоприемников — возникла в результате развития радиолокации, исчерпавшей возможности современных электронных ламп и нуждающейся в приеме все более слабых сигналов. Этого же требует и радиоастрономия — новая наука, порожденная развитием радиотехники. Радиоастрономия изучает слабое электромагнитное излучение,

исходящее от небесных источников. Чем более слабые сигналы могут быть зафиксированы при помощи радиотелескопов, тем дальше в глубь Вселенной проникнет человеческое познание.

Обе эти задачи решаются на основе новой науки — радиоспектроскопии. Радиоспектроскопия, аналогично обычной оптической спектроскопии, изучает спектры атомов и молекул, получая при их помощи сведения о строении микромира. Но в отличие от оптической спектроскопии, исследующей область видимого света шириной примерно в одну октаву, радиоспектроскопия исследует спектры в диапазоне радиоволн. Этот диапазон простирается от волн длиной в доли миллиметра до очень длинных электромагнитных волн, занимая область шириной в десятки октав. Естественно, что технические средства, применяемые радиоспектроскопией при наблюдении миллиметровых и сантиметровых волн или волн длиной в десятки и сотни метров, оказываются различными.

Но не только это обусловливает многообразие методов радиоспектроскопии. В радиоспектроскопии можно выделить три существенно различные ветви, отличающиеся как техническими средствами, так и областью применения.

Самая старая ветвь — это исследование резонансных явлений в атомных и молекулярных пучках с индикацией по интенсивности пучка, возникшая 20 лет назад (1938 г.) в результате опытов американского ученого И. И. Раби и его сотрудников. Эта ветвь сыграла существенную роль в создании одного из типов атомных стандартов частоты.

Вторая ветвь возникла, по существу, в 1942 г., когда начали появляться теоретические работы советского ученого В. Л. Гинзбурга, посвященные поглощению радиоволн в газах. До этого была известна лишь изолированная экспериментальная работа К. Клитона и Н. Вильямса, наблюдавших в 1934 г. поглощение сантиметровых радиоволн в аммиаке. О бурном развитии этой области радиоспектроскопии говорит следующее: до 1945 г. опубликовано 5 работ, посвященных этим вопросам, в 1946 г. — 22, в 1947 г. — 50, а в настоящее время число их превысило тысячу. Эта ветвь — радиоспектроскопия газов — привела к созданию наиболее монохроматичного источника радиоволн — молекулярного генератора.

Третья ветвь развилась из работ Е. К. Завойского, открывшего в 1944 г. явление парамагнитного резонанса, т. е. резонансного поглощения радиоволн твердыми телами

и жидкостями, содержащими парамагнитные ионы, которые ведут себя подобно маленьким магнитам. Это направление привело к созданию широкодиапазонных перестраиваемых усилителей, которые, как уже установлено, обладают предельно малыми внутренними шумами.

Прежде чем перейти к описанию действия молекулярных генераторов и усилителей, необходимо кратко познакомиться с основными свойствами, отличающими микромир от привычного нам мира крупных тел и больших энергий.

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

В повседневной жизни и во всех областях техники мы встречаемся лишь с большими телами, подчиняющимися законам классической физики. Это значит, что такие величины, как масса тела, его энергия, скорость и т. п., могут принимать практически любые значения. Отклонения от этих законов были впервые обнаружены немецким физиком М. Планком при исследовании процессов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Он нашел, что энергия может переходить от поля к веществу и обратно не произвольным образом, а лишь вполне определенными порциями — квантами. Впоследствии величайший физик XX в. А. Эйнштейн создал квантовую теорию света, суть которой состоит в том, что энергия в световой волне существует в виде определенных порций — квантов света. Он же построил квантовую теорию фотоэффекта, объясняющую процесс взаимодействия квантов света с веществом, приводящий к выбиванию из него электронов. Вскоре датчанин Н. Бор разработал теорию строения атома, основанную на представлении о прерывистом, дискретном характере его внутренней энергии.

Если элементарные частицы — электроны, протоны и другие — свободно передвигаются в пространстве, то они могут обладать произвольными скоростями, а значит и любой кинетической энергией. Это же относится к атомам и молекулам, если они перемещаются как одно целое. Но если элементарные частицы взаимодействуют между собой (например, образуя атомы, или если атомы соединяются в молекулы) и основную роль играют взаимные движения частей сложной системы, то положение меняется. Внутренняя энергия таких микросистем не может принимать произвольные значения, а лишь вполне определенные. Как говорят, энергия квантованна. Это значит, что для каждой

системы существует вполне определенный набор допустимых значений энергии. Поэтому изменения внутренней энергии микросистемы могут происходить только скачками между ее допустимыми значениями. Эти значения энергии, или энергетические уровни, определяются как внутренним строением самой системы, так и влиянием на нее других систем, например через посредство электромагнитных полей.

В обычных случаях удобно измерять энергию в киловатт-часах, килограммометрах, а при физических расчетах часто пользуются малой величиной — эргом.

В микромире удобнее пользоваться другими единицами измерения энергии. В атомной физике широко применяется единица энергии «электрон-вольт», равная энергии, приобретаемой электроном под воздействием электрического поля в 1 *в*. Например, при излучении кванта света внутренняя энергия атома изменяется на несколько электрон-вольт. Кванты электромагнитного поля радиоволн сантиметрового диапазона обладают энергией порядка десятитысячной или стотысячной доли электрон-вольта. Таким величинам соответствуют изменения вращательной энергии молекул и изменения энергии парамагнитных ионов в магнитных полях, обычно применяемых в лабораторных условиях. Следовательно, для радиодиапазона даже электрон-вольт оказывается слишком крупной единицей энергии.

При работе в сантиметровом диапазоне удобно измерять энергетические переходы молекулярных и атомных систем даже не в таких единицах как эрг или электрон-вольт, а, как это ни странно, в мегагерцах. Это возможно потому, что энергия и частота электромагнитной волны тесно связаны между собой. Изменение энергии системы от значения W_2 до W_1, измеренное в эргах, равно постоянной Планка ($h=6{,}610^{-27}$ *эрг·сек*), умноженной на частоту излучаемой системой электромагнитной волны в мегагерцах:

$$W_2 - W_1 = h\nu_{12}.$$

Оказывается, что энергия в 10 000 *Мгц* соответствует как раз интересующим нас переходам с изменением вращательной энергии молекул, а энергия в 1 000 *Мгц* — энергии парамагнитных ионов в полях обычных магнитов.

Итак, изменения энергии в атомах и молекулах, сопровождающиеся поглощением или излучением радиоволн, удобно характеризовать частотой этих волн (рис. 1).

Отметим, что внутренняя энергия молекулы складывается из ряда частей. Наибольшая часть связана с движением электронов и соответствует излучению или поглощению видимого света, затем следует энергия колебаний атомов в молекуле, соответствующая инфракрасным волнам. Изменения энергии вращения молекулы как целого приводят к поглощению или излучению сверхвысоких частот радиодиапазона. Небольшая часть энергии, обусловленная взаимодействием вращательного и колебательного движения, связана с радиоволнами порядка сотен мегагерц.

Таким образом, каждая молекула или атом могут быть охарактеризованы вполне определенным набором энергетических состояний.

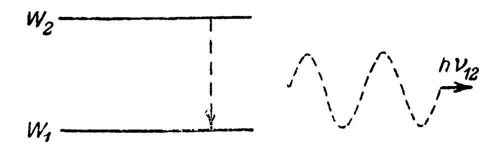


Рис. 1. Уменьшение внутренней энергии системы ($W_2 - W_1$) может сопровождаться излучением кванта электромагнитной энергии $h\nu_{12}$.

Переход молекулы из одного энергетического состояния в другое связан с излучением или поглощением кванта электромагнитной энергии, т. е. с излучением или поглощением электромагнитной волны. Частота электромагнитного колебания, соответствующая этой волне, как указано выше, однозначно связана с изменением внутренней энергии молекулы. Каждый такой переход связан с возникновением в спектре молекулы определенной спектральной линии, а все возможные для данной молекулы переходы образуют ее спектр. Для каждой изолированной молекулы ее спектр зависит только от ее внутреннего строения и поэтому остается совершенно неизменным. Следовательно, любые самопроизвольные изменения энергии в изолированной молекуле сопровождаются излучением электромагнитных колебаний со строго определенной частотой, а, следовательно, соответствующие спектральные линии должны быть очень узкими. Это значит, что изолированные молекулы могли бы служить идеальными эталонами частоты.

Но практически получить излучение заметной мощности от одиночных молекул невозможно. Получение мощности, достаточной для практики, требует участия большого чис-

ла излучающих частиц и всегда приводит к тому, что излучающие молекулы вынуждены взаимодействовать между собой, с окружающими телами и с электромагнитным полем, а через него друг с другом.

Но при этом энергетические уровни не остаются неизменными. Всякое внешнее воздействие «возмущает» их, приводя к изменениям частоты излучаемых электромагнитных волн. При этом в зависимости от характера возмущения может изменяться ширина излучаемой спектральной линии или положение ее максимума. Поэтому при использовании молекулярных систем для получения стабильных колебаний необходимо принимать меры для уменьшения всех воздействий, возмущающих энергетические уровни молекул. Все вышесказанное относится и к атомам.

Наиболее устойчивым состоянием каждой системы, в том числе и атома или молекулы, является состояние с наименьшей энергией. Поэтому каждая такая система стремится сохранить это состояние или перейти в него, если в начальный момент она обладает избыточной энергией. Значит можно было бы ожидать, что все атомы и молекулы находятся в состояниях, соответствующих самому нижнему уровню энергии. Однако в действительности это не так.

При анализе процессов, в которых участвует весьма большое число одинаковых атомов или молекул, необходимо учитывать влияние хаотического теплового движения.

Тепловое движение выводит часть молекул из состояния с минимумом энергии, переводя их на те или другие из высших энергетических уровней. Дело в том, что при столкновениях молекул часть кинетической энергии теплового движения может перейти в энергию внутренних движений молекул, например в колебания атомов относительно центра тяжести молекулы. Возможен, конечно, и обратный переход внутренней энергии в энергию поступательного движения. При этом ситуация вполне аналогична случаю распределения молекул воздуха в поле тяжести Земли. При отсутствии теплового движения (при абсолютном нуле температуры) все молекулы имели бы минимальную потенциальную энергию и сосредоточились бы на поверхности почвы. Однако в действительности они распределены в значительной толще атмосферы. Ясно, что те молекулы, которые находятся вблизи поверхности почвы, обладают меньшей потенциальной энергией, чем находя-

щиеся более высоко, причем энергия молекулы увеличивается с высотой. В результате хаотического движения молекулы соударяются и обмениваются имеющимися у них запасами энергии.

Как известно, плотность атмосферы убывает по мере увеличения высоты. Это значит, что количество молекул с большой потенциальной энергией оказывается меньшим, чем количество молекул с малой энергией (рис. 2). Математически это распределение выражается известной барометрической формулой. Закон, описывающий распределение молекул между состояниями с различными энергиями, называется распределением Больцмана. Этот закон применим и в интересующем нас случае.

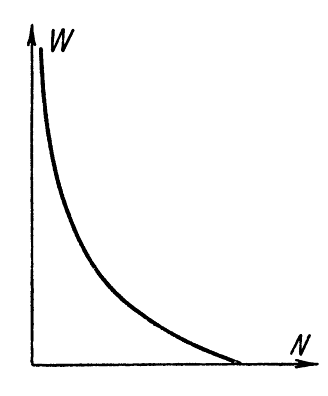


Рис. 2. Изменение плотности атмосферы с высотой.

Потенциальная энергия молекул W пропорциональна высоте над уровнем моря. Число частиц в единице объема N (плотность) убывает вдвое на высоте около 6 *км* над уровнем моря.

Если измерять разность энергий между двумя уровнями в единицах частоты, умноженных на постоянную Планка, то отношение числа молекул на двух уровнях выражается очень простой формулой

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu_{12}}{kT}}.$$

Здесь N_1 — число молекул, обладающих внутренней энергией W_1; N_2 — то же для W_2, так что $W_2 - W_1 = h\nu_{12}$; k — постоянная Больцмана ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-16}$ *эрг/град*); T — абсолютная температура. Отсюда видно, что при малых температурах большинство молекул находится в состоянии с меньшей энергией, а по мере повышения температуры число молекул в обоих состояниях постепенно выравнивается. Однако равенство достигается лишь при бесконечно высокой температуре, т. е. практически никогда (рис. 3).

Итак, система из многих молекул, предоставленная самой себе, будет находиться в состоянии подвижного термодинамического равновесия, описываемого формулой Больцмана. Это значит, что пока температура остается неизменной, любые внутренние процессы, происходящие в системе, не приводят к отклонению системы от этого состояния. Что же будет, если какая-нибудь внешняя при-

чина выведет систему из состояния термодинамического равновесия? Пусть, например, внезапно уменьшится температура оболочки (сосуда), в которую заключены молекулы. Тогда при ударах молекул о стенку они будут в среднем отдавать ей больше энергии, чем получать от нее. Поэтому со временем средняя энергия молекул умень-

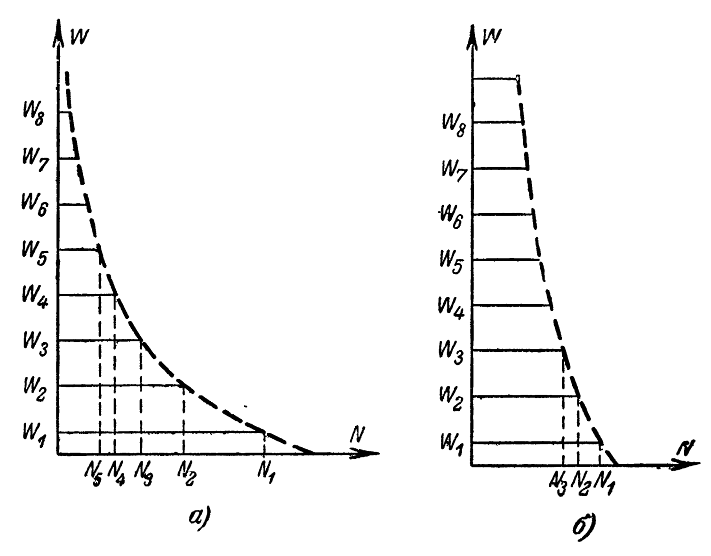


Рис. 3. Распределение частиц в микросистеме.
а — при низкой температуре большинство частиц находится на нижних уровнях
б — при высокой температуре распределение частиц по уровням становится более равномерным.

шится и через некоторое время система придет к новому равновесному состоянию, соответствующему низшей температуре. Конечно, аналогично будет обстоять дело и при повышении температуры оболочки. Такие изменения будут происходить по простейшему закону, описываемому экспоненциальной функцией.

Этот же закон описывает процесс разряда конденсатора через сопротивление. Обычно такие процессы называются релаксационными.

Существует и другая возможность отклонения системы от равновесного состояния. При неизменной температуре какие-нибудь внешние причины, детали которых несущественны, могут сообщить дополнительную энергию части молекул за счет другой их части. Это значит, что

распределение молекул по энергиям не будет соответствовать равновесному, хотя полная энергия системы не отличается от равновесной. Но в результате взаимного обмена энергиями внутри системы она вновь придет к равновесному состоянию. Этот процесс тоже называется релаксационным процессом.

В соответствии с квантовой теорией электромагнитного поля, сформулированной первоначальной Эйнштейном для света, энергия поля существует в виде фотонов, т. е. в виде порций энергии. Для волны с частотой ν каждая порция энергии равна $h\nu$ и не может быть меньше. Поэтому обмен энергией между молекулой и электромагнитной волной частоты ν возможен, только если у молекулы имеются уровни энергии, разность между которыми $W_2 - W_1 = h\nu$.

Взаимодействие молекулы с полем излучения зависит от состояния, в котором находится молекула. Предположим, что молекула имеет два уровня энергии, различающиеся как раз на величину кванта энергии поля, в котором находится молекула. Пусть в начальный момент молекула находится на нижнем энергетическом уровне. В этом случае результатом взаимодействия может быть только поглощение кванта с переходом молекулы на верхний энергетический уровень. Если же молекула первоначально находилась на верхнем уровне, то единственным результатом ее взаимодействия с полем является излучение фотона. При этом энергия молекулы уменьшается (она переходит на низший уровень), а энергия поля возрастает. Этот процесс называется индуцированным излучением, т. е. излучением, вызванным полем.

Еще Эйнштейн установил, что вероятность поглощения и вероятность индуцированного излучения при таких условиях в точности равны между собой. Этот факт играет основную роль в молекулярных генераторах и усилителях. Это значит, что если в поле независимо существуют две молекулы и одна из них находится в верхнем энергетическом состоянии, а вторая в нижнем, то, взаимодействуя с электромагнитным полем, они обладают одинаковой вероятностью — первая — излучить, а вторая — поглотить фотон так, что общий баланс энергии поля останется неизменным.

Помимо этих двух процессов, существует еще процесс спонтанного (самопроизвольного) излучения. При этом молекула, находящаяся в верхнем состоянии, переходит в нижнее с излучением фотона независимо от внешнего

поля. Этот процесс, однако, не имеет для нас существенного значения, так как в радиодиапазоне его вероятность крайне мала.

Необходимо упомянуть также о том, что выполнение условия частот еще недостаточно для того, чтобы молекула могла взаимодействовать с полем. Дело в том, что условие частот, по существу, выражает закон сохранения энергии: изменение энергии молекулы должно быть равно изменению энергии поля. Выполнение этого закона необходимо, но оно недостаточно для реализации перехода. Необходимо, чтобы при этом переходе выполнялись и другие законы, например закон сохранения моментов, действующий и в макромире, и ряд специальных законов микромира, например закон сохранения симметрии и другие законы, приводящие к так называемым правилам отбора, запрещающим ряд энергетически допустимых переходов.

Укажем на важный вывод из приведенных выше закономерностей.

Так как в равновесном состоянии всегда бо́льшая часть молекул находится на низшем из пары рассматриваемых энергетических состояний, а вероятности поглощения и индуцированного излучения для каждой молекулы одинаковы, то в этих условиях число актов поглощения энергии из поля всегда больше числа актов индуцированного излучения. Это объясняет, почему в обычных условиях вещество поглощает электромагнитную волну. Чем сильнее электромагнитная волна, тем интенсивнее осуществляется поглощение. Поэтому в процессе поглощения проявляется тенденция к нарушению термодинамического равновесия. Этой тенденции противодействуют релаксационные процессы, стремящиеся вернуть систему к состоянию равновесия.

Если поле волны очень интенсивно, то релаксационные процессы не могут противодействовать его влиянию и в результате преимущественного поглощения с переходом молекул из состояния с меньшей энергией в верхнее состояние число их на обоих уровнях может практически сравняться. Дальнейшее увеличение интенсивности поля уже не приведет к увеличению поглощения. Поглощаемая энергия не может стать больше той, которая отводится из среды релаксационными процессами. В этом случае говорят, что достигнуто насыщение, а соответствующий процесс называется эффектом насыщения.

Рассмотрим еще раз только что описанный процесс конкуренции между поглощением и индуцированным излучением. Так как для каждой отдельной молекулы вероятности этих процессов одинаковы, то всегда можно описать результат следующим образом: определим число молекул, находящихся в верхнем состоянии; пусть оно будет N_2, и выделим такое же число из молекул, находящихся в нижнем состоянии. Тогда излучение из первой группы молекул будет в среднем полностью компенсироваться поглощением второй группы молекул, а, значит, все они не будут принимать участия в образовании окончательного результата. Все будет определяться остатком $N_1—N_2$ молекул, находящихся в нижнем состоянии. Именно они будут осуществлять поглощение.

Если интенсивность поля невелика, а релаксационные процессы достаточно сильны, чтобы поддерживать термодинамическое равновесие, то легко подсчитать количество молекул, осуществляющих поглощение. Оно равно:

$$N_1 - N_2 = \frac{h\nu}{2kT} N,$$

где $N = N_1 + N_2$ — общее количество имеющихся молекул.

Значит газ, содержащий N молекул, находящихся в термодинамическом равновесии, поглощает не больше, чем газ, в котором имеется лишь $\frac{h\nu}{2kT} N$ молекул, причем все они находятся в нижнем состоянии.

Если же действие поля существенно превосходит действие релаксационных процессов, то термодинамическое равновесие нарушается и разность $N_1—N_2$ уменьшается тем больше, чем сильнее поле.

До сих пор мы не видели возможности получить от молекулярной системы излучение радиоволн. Действительно, в системах, находящихся в термодинамическом равновесии, это практически невозможно, так как поглощение здесь всегда преобладает над индукцированным излучением, а спонтанное излучение столь мало, что не играет никакой роли.

Для получения излучения необходимо найти способ столь сильно нарушить термодинамическое равновесие, чтобы число молекул в верхнем энергетическом состоянии превысило их число в нижнем состоянии. В этом состоит основная задача, которую приходится решать при создании молекулярных усилителей и генераторов (рис. 4).

Если эта задача решена, то индуцированное излучение будет преобладать над поглощением, а, значит, молекулярная система сможет отдавать часть своей внутренней энергии электромагнитному полю. При прохождении в такой среде электромагнитной волны ее интенсивность будет возрастать по мере продвижения внутрь среды, а среда в результате взаимодействия с волной будет приближаться к состоянию термодинамического равновесия.

По-видимому, впервые возможность создания квантовой системы, способной отдавать энергию электромагнит-

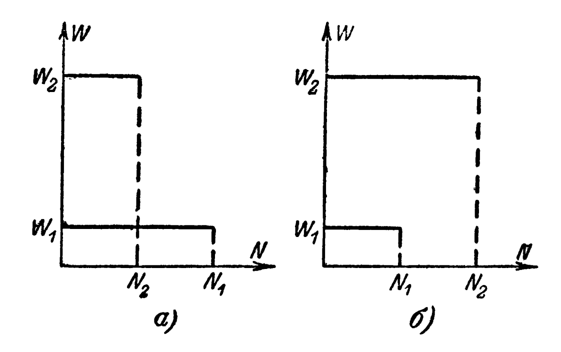


Рис. 4. Квантовая система с двумя энергетическими уровнями.

а — в поглощающем состоянии ($N_1 > N_2$); *б* — в активном состоянии ($N_2 < N_1$).

ной волне, т. е. возможность экспериментального получения индуцированного излучения, была обоснована в докторской диссертации В. А. Фабриканта, защищенной им в Физическом институте Академии наук СССР в 1939 г. Содержание этой работы было опубликовано в печати в 1940 г. Однако эта пионерская работа появилась за 15 лет до того, как техника дала возможность реализации выдвинутой в ней идеи, и поэтому она была незаслуженно забыта.

Экспериментально эта возможность была продемонстрирована лишь 10 лет спустя, в 1950 г., американскими физиками Пэрселом и Паундом, но и значение их работы не было сразу оценено в полной мере. Суть их опыта можно кратко пояснить следующим образом. Ядра многих атомов обладают магнитными свойствами, т. е. ведут себя в магнитных полях подобно маленьким магнитикам. В этих случаях физики говорят, что ядро обладает маг-

нитным моментом. Опыт проводился с кристаллом фтористого лития (LiF). Ионы фтора и лития, из которых состоит этот кристалл, образуют в пространстве определенную структуру, называемую кристаллической решеткой. Несмотря на то, что ионы при этом сильно связаны между собой, ядра фтора и лития могут не только колебаться вокруг своего положения равновесия, но и вращаться в пространстве.

Под воздействием магнитного поля ядра подобно магнитным стрелкам стремятся повернуться так, что их магнитные моменты оказываются ориентированы по магнитному полю. Это соответствует минимуму их энергии в магнитном поле. По законам квантовой механики допустимы лишь вполне определенные значения энергии, связанные с ориентировкой ядер в магнитном поле. Для ядер фтора возможны лишь две ориентации: по полю и против поля. Для ядер основного изотопа лития — четыре ориентации.

Если бы кристалл фтористого лития имел температуру, близкую к абсолютному нулю, то со временем все ядра фтора повернулись бы в энергетически более выгодное направление — по полю. При более высокой температуре часть из них оказывается направленной против магнитного поля, приобретая необходимую для этого избыточную энергию за счет тепловой энергии кристалла. Ядра лития тоже распределяются между возможными для них состояниями в соответствии с законом Больцмана.

Если поместить кристалл фтористого лития в поле электромагнитной волны, частота которой соответствует разности между энергиями ядра фтора, ориентированного по полю и против него, то ядра, ориентированные по полю (т. е. находящиеся на нижнем энергетическом уровне), смогут поглотить из поля квант энергии и за этот счет повернуться против поля. Таким образом, кристалл поглощает энергию электромагнитной волны. Аналогично ведут себя и ядра лития.

Теперь представим себе такой опыт: продержав кристалл фтористого лития в магнитном поле достаточно долго, экспериментатор внезапно изменяет направление поля на противоположное. Но ориентировка ядер не может измениться столь же внезапно. Поэтому большинство из них оказывается ориентированным против поля, т. е. они оказываются в энергетически невыгодном состоянии— обладают избыточной энергией Если после этого напра-

вить на кристалл электромагнитную волну той же частоты, что и в первом случае, то вместо поглощения энергии из волны кристалл будет отдавать ей свою избыточную энергию.

Подобный опыт был осуществлен. Конечно, в действительности он был более сложным. Его результат записан на ленте, часть которой изображена на рис. 5 Выбросы кривой, направленные вверх, соответствуют поглощению энергии. В момент, отмеченный стрелкой, изменяется на-

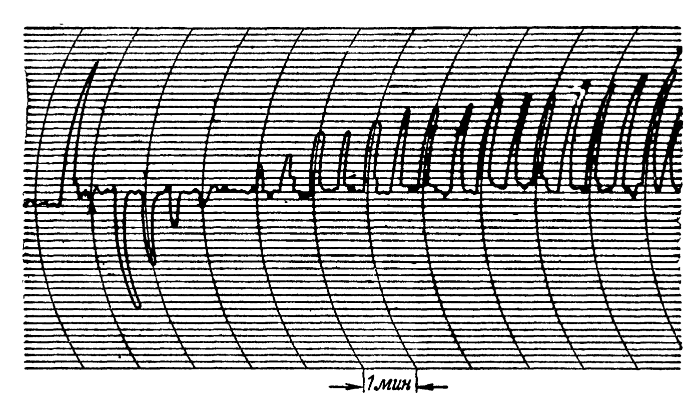


Рис. 5. Излучение и поглощение электромагнитной энергии кристаллом LiF (по Пэрселу и Паунду).

Левый пик — поглощение, характеризующее термодинамически равновесное состояние кристалла в постоянном магнитном поле. Стрелка указывает момент инверсии магнитного поля. Вслед за инверсией кристалл находится в активном состоянии и отдает энергию электромагнитному полю. Виден постепенный переход к равновесному состоянию.

правление магнитного поля относительно кристалла. Вслед за этим вместо поглощения наблюдается столь же сильное излучение, постепенно уменьшающееся по мере того, как кристалл приближается к равновесному состоянию в результате поворота ядер по полю. Когда число ядер, ориентированных в обоих направлениях, сравнивается, то кристалл не излучает и не поглощает, так как число актов излучения и поглощения оказывается одинаковым. Это состояние тоже видно на рисунке. Но из-за тепловых взаимодействий (из-за процессов релаксации) все больше ядер поворачивается по полю, поэтому такая ориентировка начинает преобладать и кристалл снова начинает все более сильно поглощать электромагнитную волну.

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Как теперь стало известно, независимо и практически одновременно в трех научно-исследовательских учреждениях — Физическом институте Академии наук СССР, в Колумбийском и Мэрилэндском университетах США — начались новые замечательные работы. Ученые решили заставить молекулы излучать радиоволны.

В докладе, прочтенном летом 1952 г. на Всесоюзной конференции по радиоспектроскопии, Н. Г. Басов обосновал возможность создания молекулярного усилителя и генератора радиоволн. Первое описание действующего молекулярного генератора было опубликовано в статье группы работников Колумбийского университета в Нью-Йорке, руководимой Ч. Таунсом, в 1954 г.

Молекулярный генератор, независимо созданный в это же время Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в Физическом институте Академии наук СССР в Москве, как впоследствии выяснилось, был основан на тех же принципах, но обладал некоторыми конструктивными преимуществами по сравнению с американским прибором.

Это один из поразительных примеров того, когда прогресс, движимый потребностями практики и опирающийся на предыдущие достижения науки и техники, идет параллельно в различных странах.

Теперь молекулярные генераторы с пучком молекул аммиака имеются в ряде институтов Советского Союза и США.

Молекулу аммиака можно назвать пробным камнем радиоспектроскопии. Аммиак явился первым газом, подробно изученным радиоспектроскопическими методами, а затем на нем отрабатывались различные схемы радиоспектроскопов и были обнаружены и исследованы многочисленные тонкие эффекты. Аммиак обладает наиболее интенсивными спектральными линиями, известными в настоящее время в сантиметровом диапазоне радиоволн.

Молекула аммиака состоит из трех атомов водорода и одного атома азота, образующих правильную пирамиду. Атомы водорода расположены в вершинах равностороннего треугольника, лежащего в основании пирамиды, а атом азота расположен над его центром (рис. 6). Силы электрического притяжения, объединяющие атомы водорода и азота в молекулу аммиака, не способны жестко зафиксировать их в вершинах пирамиды Эти силы можно уподобить пружинкам, так как они допускают колеба-

ния атомов вокруг их положений равновесия. Колебательная энергия молекулы является одной из форм ее внутренней энергии и поэтому, как мы знаем, может меняться только скачками, величина которых является определенной характеристикой молекулы данного типа — ее паспортом.

В молекуле аммиака наблюдается замечательное явление, не имеющее аналогии в макромире и не поддающееся объяснению без помощи квантовой механики. Это явление называется инверсией. Оно состоит в том, что молекула аммиака без всяких внешних воздействий внезапно изменяет свой вид. Атом азота, находившийся над треугольником из атомов водорода. вдруг оказывается под ним, а затем без каких-либо воздействий возвращается обратно. Наиболее поразительным является то, что этот процесс не требует никакой затраты энергии. В необычности этого процесса легко убедиться на модели молекулы аммиака, сделанной из четырех шариков, соединенных пружинками. Для того чтобы продавить «атом азота» через плоскость, образованную в модели «атомами водорода», необходимо сжать пружинки, затратив на это определенную энергию. Если же «атомы» в модели совершают лишь малые колебания вокруг положения равновесия, то такой переход без поступления добавочной энергии извне, конечно, невозможен. Как говорят физики, такому переходу мешает потенциальный барьер. В нашей модели это барьер, образованный силами пружинок. Для перехода через потенциальный барьер необходима определенная энергия.

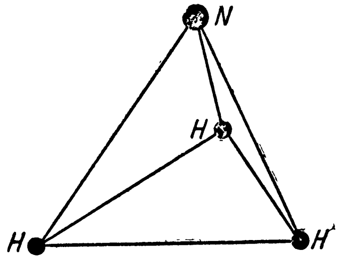


Рис. 6. Стуктура молекулы аммиака.

В микромире, как следует из законов квантовой механики, имеется определенная вероятность перехода через потенциальный барьер даже в том случае, если система обладает энергией, много меньшей, чем для этого нужно по законам обычной механики. Для того чтобы пояснить эту возможность, иногда говорят о «туннельном эффекте». Говорят, что частица, не обладающая энергией для перехода через потенциальный барьер, имеет все же определенную вероятность пройти сквозь него. При этом потен-

циальный барьер можно представить в виде горного кряжа, в котором имеется туннель, сквозь который с некоторой вероятностью может пройти частица, обладающая малой энергией, недостаточной для того, чтобы перевалить через вершину.

Возможность инверсии существенно влияет на допустимые уровни энергии молекулы аммиака, а следовательно, на ее спектр. Процесс инверсии вызывает раздвоение некоторых уровней энергии и проявляется в оптическом спектре молекулы в расщеплении ее спектральных линий. Различие внутри каждой пары уровней энергии, образовавшейся в результате инверсии, мало по сравнению с расстояниями между остальными уровнями (рис. 7). Эта разность соответствует энергии квантов электромагнитных волн сантиметрового диапазона. Длина радиоволны, связанной с наиболее интенсивным из этих переходов, равна 1,27 *см*.

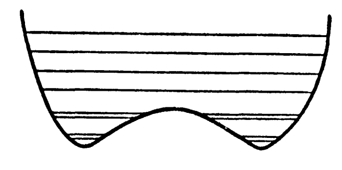


Рис. 7. Система уровней энергии молекулы аммиака.

Для работы молекулярного генератора имеет значение какая-нибудь пара уровней энергии, порожденных возможностью инверсионного перехода. В соответствии с общим правилом в состоянии термодинамического равновесия на нижнем из каждой пары уровней находится больше молекул, чем на верхнем. Поэтому, облучая аммиак радиоволной длиной 1,27 *см*, мы всегда будем наблюдать поглощение этой волны — по мере продвижения внутри сосуда с газом волна будет постепенно ослабляться. Для того чтобы ослабление волны заменилось усилением, необходимо нарушить термодинамическое равновесие, т. е. сделать так, чтобы на верхнем энергетическом уровне находилось больше молекул, чем на нижнем. Наиболее благоприятным было бы с этой точки зрения такое состояние, при котором на верхнем энергетическом уровне находились бы все молекулы, а на нижнем не было бы ни одной.

К счастью молекулы аммиака обладают свойством, позволяющим отделить друг от друга молекулы, находящиеся на верхнем и нижнем уровнях энергии, образовавшихся в результате инверсии. Дело в том, что при помещении молекулы аммиака в электрическое поле свойственные ей уровни энергии смещаются, причем энергия, соответствую-

щая верхнему инверсионному уровню, несколько увеличивается, а энергия нижнего уровня уменьшается (рис. 8). В соответствии с общим законом, по которому любая система стремится прийти в состояние, в котором потенциальная энергия имеет минимум (например, сжатая пружина стремится разжаться, заряженный конденсатор со временем разряжается), молекулы аммиака, находящиеся в нижнем энергетическом состоянии, стремятся втянуться в область сильных электрических полей, где их энергия уменьшается. Так как энергия молекул, находящихся в верхнем энергетическом состоянии, в сильных полях увеличивается, то такие молекулы должны выбрасываться из области, где действуют электрические поля, в области, в которых этих полей нет. Это свойство молекул аммиака и используется в существующих молекулярных генераторах.

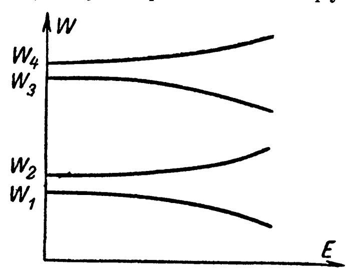
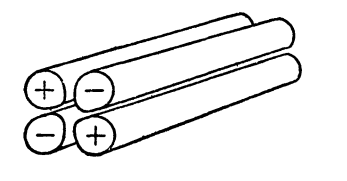


Рис. 8. Энергетические уровни молекулы аммиака в электрическом поле.

Молекулярный генератор представляет собой сосуд, из которого тщательно откачивается воздух. В откачанный таким образом объем впускается пучок молекул аммиака.



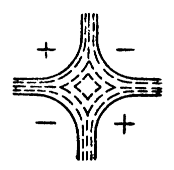


Рис. 9. Квадрупольный конденсатор.

Этот пучок проходит сквозь электрический конденсатор специальной формы вдоль его оси. Такой конденсатор состоит из четырех (квадрупольный конденсатор) или большего числа стержней—электродов, присоединенных попарно через один к положительному и отрицательному полюсам источника высокого напряжения (рис. 9). Поля, образуемые при таком включении отдельными пластинами, складываются так, что на оси конденсатора поле равно нулю, а вблизи пластин достигает наибольших значений.

Поэтому молекулы, находящиеся в верхнем энергетическом состоянии и стремящиеся, как сказано выше, выйти из поля, отклоняются к оси конденсатора. Молекулы же, находящиеся в нижнем энергетическом состоянии, отклоняются в противоположном направлении. Таким образом, можно создать условия, при которых на оси конденсатора окажутся практически только активные молекулы, обладающие избытком энергии, который они способны излучить.

Однако, как показывают расчеты и опыты, молекулы аммиака способны несколько лет летать в вакууме, прежде чем заметная часть их излучить свою избыточную энергию в виде радиоволны. Но так как скорость этих молекул при комнатной температуре превышает 1 600 *м* в секунду, то сосуд обычных размеров они пролетают за тысячные доли секунды. За это время успеет излучить радиоволны лишь ничтожная часть пролетающих молекул.

Иное дело, если в пространство, через которое пролетает пучок молекул аммиака, пропустить радиоволну длиной 1,27 *см*. Под влиянием этой волны вероятность излучения для каждой молекулы увеличивается тем сильнее, чем больше энергия волны. Значит, волна заставляет молекулы излучать радиоволны, забирая при этом избыточную энергию молекул. Поэтому по мере распространения волны сквозь пучок активных молекул ее интенсивность будет увеличиваться, энергия волны будет возрастать. Это и есть усиление радиоволны за счет внутренней энергии молекул.

Для того чтобы улучшить условия взаимодействия радиоволны сантиметрового диапазона с пучком молекул, удобно не пускать волну вдоль пучка молекул, а направлять ее в объемный резонатор, через который пролетают активные молекулы, отсортированные при помощи описанного выше конденсатора.

Так как добротность резонатора может быть достаточно большой, то поля, возбуждаемые волной в резонаторе, могут в тысячи раз превзойти поля, существующие в той же волне в свободном пространстве, а это значит, что взаимодействие молекул с волной в объемном резонаторе будет во столько же раз более сильным. Столь же сильно возрастает и эффект усиления радиоволны при том же пучке молекул.

В существующих конструкциях взаимодействие молекул с радиоволной в молекулярном усилителе происходит

внутри объемного резонатора. При этом волна, излучаемая каждой молекулой, не затухает сразу, а успевает несколько раз отразиться от стенок резонатора. Поэтому каждая молекула испытывает не только воздействие волны, поступающей в резонатор извне, но и волн, излученных ранее другими молекулами пучка. Не исключено, что квант энергии, излученный молекулой в начале ее пути в резонаторе, может быть поглощен ею же или другой молекулой и затем вновь испущен, прежде чем молекула покинет резонатор. Этот процесс аналогичен обратной связи, применяемой в ламповых генераторах и усилителях.

Можно сказать, что молекулярный усилитель представляет собой усилитель с положительной обратной связью или регенеративный усилитель. Коэффициент обратной связи определяется здесь добротностью резонатора, которая характеризует скорость затухания волны в резонаторе. Интенсивность пучка активных молекул аналогична при этом крутизне лампы. Энергия, отдаваемая пучком молекул, компенсирует потери в стенках резонатора, что приводит к увеличению эквивалентной добротности, а значит к сужению наблюдаемой полосы пропускания. При этом соответственно возрастает усиление.

Изменяя количество активных молекул, поступающих ежесекундно в объемный резонатор, можно соответственно регулировать получаемое усиление. Но увеличивать усиление молекулярного усилителя беспредельно нельзя, так же как это невозможно в регенеративном приемнике — чрезмерное увеличение крутизны лампы (или величины обратной связи) вызывает генерацию. При этом регенеративный усилитель становится генератором, он теряет способность усиливать и превращаться в передатчик. Аналогично обстоит дело и в молекулярном усилителе. Чрезмерное увеличение потока активных молекул превращает его в молекулярный генератор. При этом молекулы будут энергично излучать радиоволны и при отсутствии внешнего сигнала. Слабые электромагнитные волны, возбуждаемые в резонаторе тепловым излучением его стенок, при этих условиях приведут к самовозбуждению системы совершенно так же, как это имеет место в ламповых генераторах.

Что же отличает молекулярный генератор от генератора сантиметровых волн, работающего на электронных лампах? Прежде всего, конечно, различными являются механизмы самовозбуждения. В обычных генераторах наи-

более селективным элементом является резонатор. Поток электронов и цепи обратной связи, замыкая тракт самовозбуждения, обеспечивают подачу в контур энергии, необходимой для возбуждения и поддержания колебаний. В молекулярном генераторе наиболее селективным элементом является молекулярный пучок — система молекул, связанных между собой через электромагнитное поле. Объемный резонатор, обеспечивая их взаимодействие с электромагнитным полем, играет роль тракта обратной связи. Поток молекул, взаимодействующих между собой в объемном резонаторе, можно уподобить среде с отрицательными потерями. Эта среда не поглощает, а выделяет электромагнитную энергию.

Каковы же свойства молекулярного генератора? Основным и самым важным его свойством является необычно высокая стабильность частоты генерируемых им электромагнитных колебаний. Достаточно сказать, что два экземпляра молекулярного генератора, построенные совершенно независимо и запущенные в соответствии с определенными правилами, будут генерировать колебания, частота которых не может отличаться больше чем на одну миллиардную долю. Это свойство обычно называется абсолютной стабильностью молекулярных генераторов, ибо не существует другого источника колебаний, с которым можно было бы сравнить частоту молекулярного генератора с более высокой точностью.

Определить единицу частоты с такой точностью по вращению земного шара можно только в результате длительных и сложных астрономических измерений.

Производя взаимное сравнение сигналов нескольких экземпляров молекулярных генераторов, построенных в ФИАН, Н. Г. Басов показал, что относительное изменение частоты сигналов молекулярных генераторов за короткое время составляет меньше, чем десятитысячную часть от миллиардной доли.

Чем же обеспечивается высокая стабильность частоты молекулярного генератора и какие причины приводят к ее ограничению. Частота колебаний, излучаемых молекулами в молекулярном генераторе, определяется в основном свойствами самих молекул и выбранным в данной конструкции квантовым переходом между двумя энергетическими уровнями молекулы. Изолированная молекула является системой с вполне определенными свойствами. Молекулы, состоящие из одинаковых атомов, не отли-

чаются одна от другой ничем, кроме имеющегося у них запаса энергии. Допускаемые значения внутренней энергии — уровни энергии — при этом точно фиксированы, поэтому разности между сооответствующими уровнями постоянны, а значит, вполне определены и энергии электромагнитных квантов, которые может поглощать или излучать молекула. Следовательно, столько же точно определена и длина радиоволн, с которыми может взаимодействовать молекула. Остальные волны практически не будут взаимодействовать с этими молекулами, а молекулы не будут реагировать на наличие радиоволн несоответствующей им длины.

Выражаясь радиотехническим языком, можно сказать, что изолированная молекула представляет собой резонансную систему с практически бесконечной добротностью. В сантиметровом диапазоне эквивалентная добротность спектральной линии изолированных молекул может достигать миллиарда миллиардов.

Однако в действительных случаях такие огромные значения по различным причинам не реализуются. В газах наиболее существенной причиной падения добротности, а значит и уширения спектральных линий являются взаимные соударения молекул. Эти хаотические соударения поразному смещают энергетические уровни различных молекул, а при этом уже не все молекулы оказываются «настроенными» на одну и ту же волну. Даже одна и та же молекула вследствие соударений будет в различные моменты реагировать с волнами, имеющими несколько отличные частоты. Именно поэтому в газе, даже при малых давлениях, наблюдаются спектральные линии с эквивалентной добротностью порядка десятков или сотен тысяч.

Нужно сказать, что под «соударением» в радиоспектроскопии приходится понимать и такие взаимодействия электрических и магнитных полей молекул, при которых молекулы находятся на расстояниях, существенно бо́льших, чем сумма их радиусов, вычисляемых на основе обычной кинетической теории газов.

Имеется еще одна причина, приводящая к уширению спектральных линий. Это эффект Допплера, хорошо известный в акустике. Например, тон гудка приближающегося паровоза внезапно понижается, когда паровоз, поравнявшись с наблюдателем, начинает удаляться. Частота электромагнитных волн тоже увеличивается при сближении источника и наблюдателя и уменьшается при их удалении.

В газах молекулы движутся хаотически, причем все направления их движения равновероятны, а величина скорости для отдельной молекулы определяется законом случая, математическая форма которого дана английским физиком К. Максвеллом. В результате отдельные молекулы поглощают или излучают электромагнитные волны, частота которых может более или менее отличаться от частоты, характерной для неподвижных молекул. Это приводит к уширению спектральных линий газов. Наблюдае-

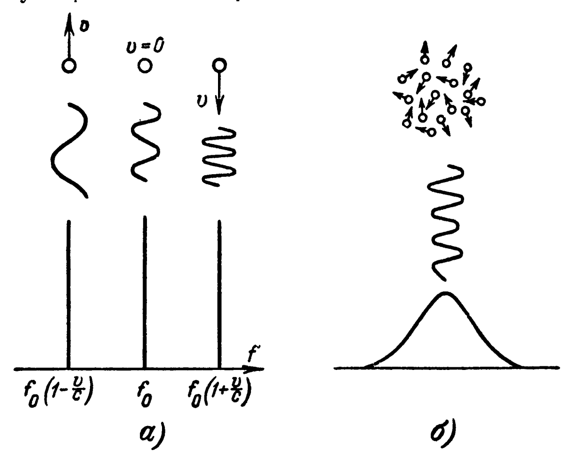


Рис. 10. Эффект Допплера.

а — зависимость частоты электромагнитной волны от скорости движения молекулы; *б* — хаотическое движение молекул приводит к уширению спектральных линий.

мые линии тем шире, чем выше температура, так как с повышением температуры увеличивается интенсивность хаотического движения молекул. Но именно вследствие хаотического характера теплового движения уширение спектральных линий газов, вызванное эффектом Допплера, оказывается симметричным по отношению к спектральной линии неподвижной молекулы. Это значит, что вершина уширенной линии совпадает с частотой, определяемой энергетическим спектром молекулы (рис. 10).

Таким образом, допплеровское уширение спектральных линий газов не приводит к систематическим ошибкам в определении частоты спектральной линии, но делает точное определение резонансной частоты затруднительным и вызывает появление нежелательных случайных ошибок.

Наиболее эффективным путем уменьшения межмолеку-

лярных взаимодействий и влияния эффекта Допплера является применение молекулярных пучков в вакууме.

Молекулярным пучком называется поток молекул, летящих в вакууме, не взаимодействуя между собой. Об условиях, необходимых для реализации молекулярного пучка, мы скажем впоследствии. Здесь достаточно отметить, что из молекулярного пучка можно при помощи диафрагм выделить молекулы, летящие приблизительно в одинаковом направлении. Если они будут лететь к наблюдателю (детектору или фотопластинке), то вследствие эффекта Допплера будет зарегистрировано повышение частоты спектральной линии молекул. Одновременно линия будет уширена, так как разброс по величине скорости сохранится, если не будут приняты специальные меры для селекции (отбора) молекул с заданной скоростью. Это привело бы к сдвигу частоты молекулярного генератора, причем величина его менялась бы с изменением температуры, которая определяет среднюю скорость молекул.

А. М. Прохоров предложил путь, позволяющий устранить это вредное явление. Дело в том, что эффект Допплера, пропорциональный скорости молекул (эффект первого порядка), возникает только, если скорость имеет составляющую вдоль направления распространения электромагнитных волн. Если же молекулы летят перпендикулярно направлению распространения волн (т. е. вдоль фронта волны), то возникает лишь так называемый эффект Допплера второго порядка, пропорциональный квадрату отношения скорости частиц к скорости света. Эта величина столь мала, что в практически важных случаях ею можно пренебречь.

В молекулярном генераторе Физического института Академии наук СССР был выбран цилиндрический резонатор, в котором возбуждается волна, фронт которой параллелен оси резонатора. Пучок молекул аммиака направляется вдоль оси резонатора, т. е. параллельно фронту волны. Поэтому эффект Допплера первого порядка здесь равен нулю. Теперь этот метод применяется в большинстве молекулярных генераторов.

Таунс и его сотрудники обратили внимание на существенное обстоятельство. Если бы молекулы, пролетая вдоль резонатора, излучали кванты радиоволн с одинаковой вероятностью в любой точке своего пути, то все было бы благополучно — поле в резонаторе было бы однородным по его длине. В действительности вероятность излу-

чения не остается постоянной. Она изменяется, достигая максимума на расстоянии примерно $^2/_3$ от точки влета молекул в резонатор. В этом месте электромагнитное поле оказывается более интенсивным, чем в остальных. В результате вдоль оси резонатора распространяется радиоволна. Эта волна бежит, следовательно, вдоль траекторий молекул, а это приводит к возникновению эффекта Доплера первого порядка даже при правильном выборе резонатора, т. е. приводит к заметной погрешности частоты.

Обнаружив это вредное явление, исследователи предложили и путь его устранения. Для этого достаточно направить в резонатор два пучка молекул навстречу друг другу. При этом в резонаторе возникнут две уравнительные волны, бегущие в противоположных направлениях, и поэтому вместо сдвига максимума спектральной линии получится лишь небольшое симметричное уширение, не приводящее к систематической ошибке в определении частоты.

Итак, молекулярный пучок позволяет устранить доплеровский сдвиг частоты и уничтожить уширение спектральной линии, связанное с соударениями молекул. В молекулярном пучке молекулы практически изолированы от взаимодействий между собой и пока они летят, на них не действуют и стенки сосуда. Единственным объектом, с которым они взаимодействуют в этих условиях, может явиться радиоволна. Но с радиоволной молекулы могут взаимодействовать только очень короткое время, в течение которого они пролетают внутри объемного резонатора. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению эффективной добротности спектральных линий молекул.

Это явление имеет ясную радиотехническую аналогию. Для того чтобы резонансный контур полностью реализовал свои селективные свойства, время, в течение которого он взаимодействует с волной, должно быть не меньше, чем его время установления. Это время, как известно, охватывает тем больше периодов колебания контура, чем больше добротность контура. Если же время взаимодействия контура с волной меньше этой величины, то селективность контура не может проявиться в полной мере. Можно считать, что ширина резонансной кривой контура, измеренная в герцах, обратно пропорциональна времени взаимодействия, измеренному в секундах. Это же относится и к спектральной линии молекулы. Ширина спектральных линий, наблюдаемых в молекулярном пучке, опреде-

ляется временем пролета молекул сквозь область, в которой действует электромагнитное поле.

Зная среднюю скорость молекул аммиака при комнатной температуре, легко подсчитать, что ширина спектральной линии, используемой в молекулярном генераторе, имеет порядок 3 000—5 000 *гц,* так что эквивалентная добротность линии составляет несколько миллионов.

Таким образом, основной причиной уширения спектральной линии в молекулярном генераторе является ограниченность времени взаимодействия молекул с радиоволной. Однако форма возникающей при этом спектральной линии симметрична относительно линии изолированной молекулы. Поэтому, если бы процесс излучения происходил в свободном пространстве, он возникал бы на частоте, соответствующей середине спектральной линии, и частота излучаемой волны оказалась бы точно совпадающей с частотой спектральной линии изолированных молекул.

В действительности излучение происходит внутри объемного резонатора. Поэтому, если объемный резонатор не настроен точно на частоту спектральной линии (а настроить его идеально точно практически невозможно), он будет воздействовать на частоту излучаемых колебаний, отклоняя ее от номинального значения. Это действие вполне аналогично явлению затягивания, широко известному для обычных ламповых генераторов с двумя настроенными контурами. Действительно, настраивая антенну, связанную с колебательным контуром лампового генератора так, чтобы обеспечить наибольшую мощность излучения, мы влияем на генерируемую частоту. Это же наблюдается при измерении частоты маломощного лампового генератора резонансным волномером. Реакция волномера может заметно изменить частоту колебаний генератора.

Наименьшее смещение частоты, естественно, будет при наиболее точной настройке резонатора. Это один из основных вопросов, решаемых при конструировании молекулярного генератора. Группа швейцарских ученых под руководством Бонономи предложила применять в молекулярных генераторах систему из двух связанных между собой резонаторов. Через один из них проходит пучок активных молекул, а второй, связанный с ним подходящим образом, служит для уменьшения реакции резонатора на генерируемую частоту.

Идея этого метода основана на том, что два одинаковых слабо связанных резонатора представляют собой колебательную систему с тупой резонансной кривой и пологой фазовой характеристикой в точке резонанса (рис. 11). Можно сказать, что такая система в узкой области вокруг середины резонансной кривой обладает очень слабыми резонансными свойствами. Именно это обеспечивает малую реакцию связанной системы на генерируемую частоту при настройке резонаторов на частоту спектральной линии. Однако в этом случае невозможно идеально точно совместить центр резонансной кривой резонаторов и центр спектральной линии, а при наличии расстройки на частоту колебаний, излучаемых молекулярным генератором, влияют, хотя и слабо, различные факторы. Существенно влияет, например, интенсивность пучка активных молекул, которая в свою очередь, зависит от постоянства потока молекул, впускаемых в прибор, и от постоянства напряжения на пластинах квадрупольного конденсатора.

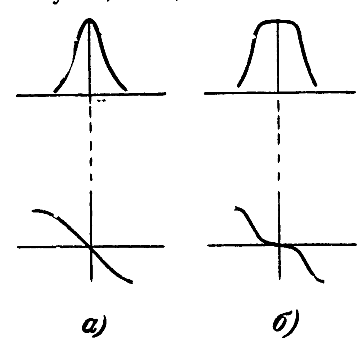


Рис. 11. Амплитудная и фазовая характеристики.
а—одиночного резонансного контура; *б* — системы из двух связанных контуров.

Заметную роль в ограничении стабильности частоты играет и то, что наиболее интенсивная спектральная линия аммиака не является простой, а состоит из трех близких между собой линий. Эта так называемая сверхтонкая структура спектра отсутствует в другой спектральной линии аммиака, поэтому при работе на ней отпадает одна из существенных причин нестабильности.

Одним из преимуществ генератора на пучке молекул аммиака является его конструктивная простота (рис. 12). Генератор состоит из трех основных частей: источника пучка, квадрупольного конденсатора и объемного резонатора. Все они помещены внутри сосуда, из которого специальный насос непрерывно откачивает воздух.

Как мы уже знаем, для повышения стабильности молекулярного генератора приходится ограничивать величину добротности объемного резонатора: чрезмерно высокая добротность приводит к затягиванию, т. е. к зависимости

генерации от настройки объемного резонатора. Но, с другой стороны, для работы генератора необходимо, чтобы энергия, вносимая ежесекундно молекулярным пучком в объемный резонатор, компенсировала потери энергии в стенках резонатора и энергию, отводимую к нагрузке. Это накладывает определенные требования на интенсивность молекулярного пучка.

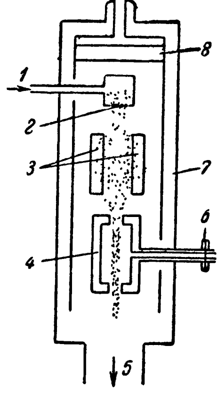


Рис. 12. Схема молекулярного генератора.

1 — впуск аммиака; *2* — источник молекулярного пучка; *3* — квадрупольный конденсатор; *4* — объемный резонатор; *5* — к вакуумному насосу; *6* — волновод со слюдяным окошком; *7* — охлаждаемый кожух; *8* — жидкий азот.

Однако сама природа молекулярного пучка, определяемая тем, что молекулы в нем не должны взаимодействовать между собой, ограничивает интенсивность пучка. Действительно, для того чтобы молекулы летели без взаимодействия, т. е. образовывали пучок, а не обычную газовую струю, необходимо, чтобы они независимо вылетали из отверстия источника. Это, в свою очередь, ограничивает давление газа в источнике пучка: давление в нем должно быть столь мало, чтобы молекулы внутри источника пролетали без соударений расстояния, не меньшие, чем размеры отверстия. В этом случае молекулы вылетают из источника независимо одна от другой и образуют в вакууме пучок.

Если, не изменяя размеры отверстия, увеличивать давление в источнике, то интенсивность пучка практически не возрастет ибо молекулы начнут соударяться в непосредственной близости к выходному отверстию и условие образования пучка (независимость путей отдельных молекул) окажется нарушенным. По мере повышения давления пучок будет превращаться в струю. Нельзя пойти и по пути увеличения размера отверстия при неизменном давлении, ибо как только размеры отверстия станут больше средней длины свободного пробега молекул в источнике, вблизи отверстия неизбежно возникнут соударения и независимость будет нарушена. Таким образом, требование отсутствия взаимодействия ограничивает интенсивность молекулярного пучка, который может быть получен от одного отверстия.

Нетрудно догадаться, что более интенсивный пучок может быть получен сложением независимых пучков, исхо-

дящих из ряда отверстий. Ученые действительно пошли по этому пути. Одиночное отверстие источника заменяется решеткой из множества мельчайших отверстий, каждое из которых столь мало, что из него вылетает не струя, а пучок невзаимодействующих частиц.

Вполне законно задать вопрос, чем же отличается такая решетка от одного отверстия большой величины? Действительно, если перемычки между отверстиями будут меньше, чем средняя длина свободного пробега молекул в источнике, отверстия перестанут быть независимыми.

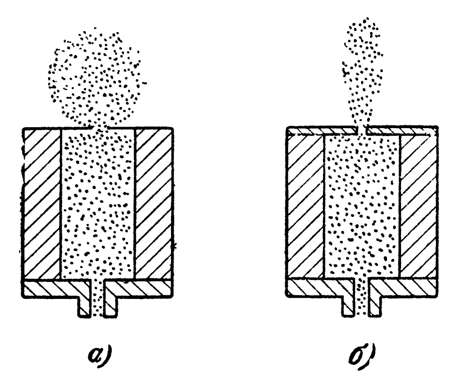


Рис. 13. Источник молекулярного пучка.
а — с бесконечно тонкой стенкой (отверстие):
б — со стенкой конечной толщины (канал).

Это ограничивает «ажурность» решетки. Выбор оптимальной решетки представляет одну из важных задач при конструировании молекулярного генератора. При этом приходится учитывать, что решетка делается из материала конечной толщины, так что отверстия в действительности представляют собой каналы.

Целесообразный выбор отношения сечения отверстий к длине каналов позволяет получить дополнительную направленность молекул, образующих пучок, и, таким путем, увеличить коэффициент использования молекул, покидающих источник (рис. 13).

Даже при наличии формирования пучка лишь малая часть его захватывается полем квадрупольного конденсатора, подвергается сортировке и в активном состоянии попадает в объемный резонатор. Бо́льшая часть молекул, покидающих источник, не принимает участия в работе генератора.

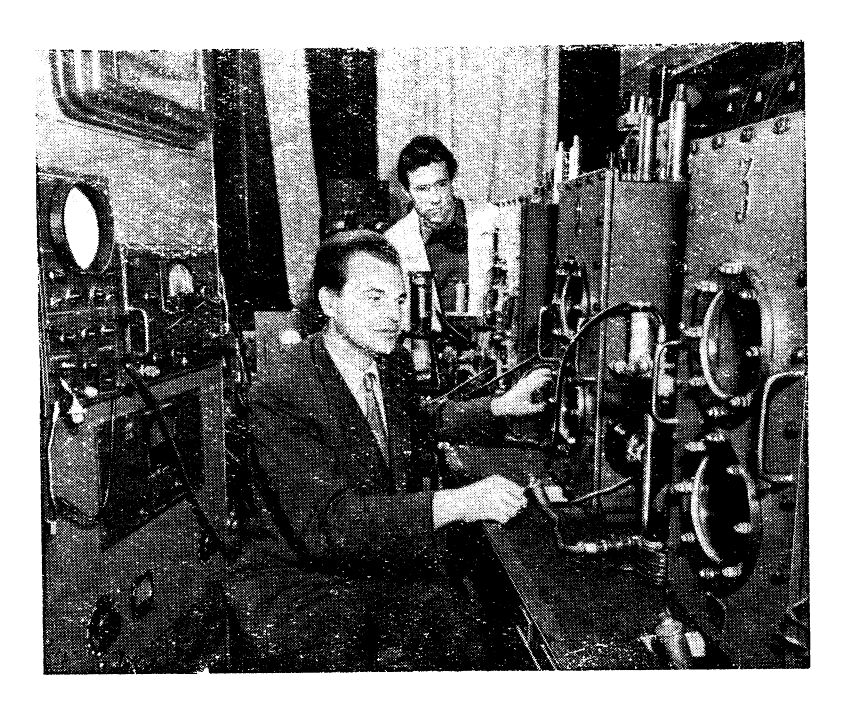


Рис. 14. Молекулярные генераторы физического института Академии наук СССР. На переднем плане доктор физ.-матем. наук Н. Г. Басов.

Для работы современного молекулярного генератора из источника должен непрерывно выходить пучок мощностью примерно миллиард миллиардов молекул аммиака ежесекундно. Такое количество газа невозможно откачать существующими насосами приемлемых размеров. Поэтому конструкторы решили обойтись без откачки аммиака. Они заменили его откачку вымораживанием. При этом используется то обстоятельство, что аммиак замерзает при —78° С. Внутрь кожуха молекулярного генератора помещаются металлические поверхности, охлаждаемые жидким азотом (—196° С). Попадая на эти поверхности, молекулы аммиака примерзают к ним.

Выдающаяся стабильность частоты молекулярных генераторов с пучком молекул аммиака обеспечивает им применение во многих областях науки и техники (рис. 14). Напротив, усилитель, получающийся из такого генератора, когда число активных молекул недостаточно для самовозбуждения, будет иметь лишь ограниченную область применения. Это связано с узкой полосой пропускания и труд-

ностью перестройки такого усилителя. По-видимому, при его помощи можно будет изучать излучение спектральных линий аммиака от космических объектов, что может дать возможность исследовать содержание аммиака в атмосферах планет. Подобные усилители могут быть созданы и при помощи некоторых других молекул.

Усилители с пучками различных молекул смогут найти также применение в качестве радиоспектроскопов с чрезвычайно большой разрешающей способностью, что позволит получить новые важные сведения о строении молекул и свойствах атомных ядер.

ПАРАМАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Для радиотехники нужны малошумящие усилители, обладающие широкой полосой пропускания и допускающие перестройку частоты в широких пределах простыми средствами.

Для того чтобы выяснить пути создания таких усилителей, нужно вспомнить, что обусловливает узкополосность молекулярного усилителя на пучке молекул аммиака. Узкополосность этого усилителя, так же как и его стабильность, обеспечивается узостью спектральной линии, наблюдаемой в пучке невзаимодействующих молекул. Для того чтобы расширить спектральную линию, достаточно поставить молекулы в условия, при которых они будут интенсивно взаимодействовать между собой. Такие условия существуют в газах, в которых молекулы хаотически сталкиваются одна с другой, и в еще большей степени в жидкостях и твердых телах. Но в газах, жидкостях и твердых телах невозможно применить метод сортировки молекул, разработанный для молекулярных пучков.

Один из возможных способов приведения в излучающее состояние твердого тела был, как уже говорилось, реализован Пэрселом и Паундом в их опытах с кристаллом фтористого лития. При этом использовались энергетические уровни магнитных моментов ядер лития во внешнем магнитном поле. Аналогичная методика может быть применена и для магнитных моментов парамагнитных ионов, величина которых почти в две тысячи раз больше, чем магнитные моменты ядер. Такие системы могут работать в сантиметровом диапазоне при магнитных полях в несколько тысяч эрстед.

Реализация этого метода возможна различными путями. Проще всего периодически менять направление внеш-

него магнитного поля, но при этом усилитель тоже будет работать периодически. В течение некоторого времени, после инверсии (перемены направления) поля, система будет находиться в неравновесном состоянии и способна отдавать энергию. Затем она вследствие процессов релаксации должна снова вернуться к равновесному состоянию. Только после этого можно произвести следующую инверсию, вслед за которой система снова способна в течение некоторого времени отдавать энергию полю. В этом случае источником энергии, отдаваемой системой электромагнитному полю, является быстро меняющееся магнитное поле, которое, по существу, нагревает кристалл. Кристалл отдает часть своей энергии электромагнитной волне, при этом его температура несколько уменьшается. Приходя в состояние термодинамического равновесия, кристалл принимает температуру окружающей среды.

Возможен и другой способ, он сводится к тому, что парамагнитные кристаллы помещаются на внешней части вращающегося диска, который переносит их из одного магнитного поля в другое, имеющее противоположное направление. Если в одном из полей образец находится в состоянии термодинамического равновесия (т. е. магнитные моменты ионов ориентированы преимущественно вдоль поля), то при достаточно быстром переносе образца в поле противоположного направления магнитные моменты ионов окажутся ориентированными преимущественно против поля и смогут возвращаться в состояние равновесия с излучением электромагнитной энергии. Однако ни один из методов, применяющих инверсию магнитного поля, еще не реализован в виде действующего усилителя из-за ряда существенных трудностей.

Основной из них является необходимость крайне быстрого изменения направления внешнего магнитного поля. Пэрселл и Паунд достигли этого путем быстрого разряда конденсатора через подмагничивающую катушку. Для получение того же эффекта переносом образца из одного поля в противоположное необходимо обеспечить весьма большие скорости движения, определяемые периодом движения парамагнитных моментов ионов во внутренних полях образца.

Дополнительную трудность представляет выбор материала с подходящим временем релаксации. Оно должно быть достаточно большим, чтобы активное состояние, полученное при инверсии, не исчезло до того, как образец

попадет в рабочий резонатор. Но, с другой стороны, время релаксации не должно быть очень большим, чтобы после выхода из резонатора образец смог достаточно быстро возвратиться к состоянию термодинамического равновесия.

Не реализован в настоящее время и метод импульсной инверсии, основанный на том, что для каждой отдельной частицы вероятность перехода под действием высокочастотного поля с нижнего уровня на верхний и с верхнего на нижний одинакова. Это значит, что число переходов в обоих направлениях пропорционально количеству частиц на соответствующем исходном уровне. Если первоначально образец находится в состоянии термодинамического равновесия, то в первое время после включения высокочастотного поля число переходов с поглощением превосходит число обратных переходов. Следовательно, для данной мощности высокочастотного поля можно выбрать длительность его воздействия на образец как раз такой, что после его выключения на верхнем уровне останется несколько больше частиц, чем на нижнем, т. е. образец перейдет в активное состояние и в течение некоторого времени сможет служить для усиления. Воспользовавшись какимнибудь приспособлением (например, вращающимся диском) для транспортировки образца из области возбуждения в рабочую область, можно в принципе построить непрерывно действующий усилитель или генератор. Осуществляя при этом возбуждение в наиболее удобном частотном диапазоне и выбирая для этого соответствующее магнитное поле, можно затем осуществлять усиление (или генерацию) в диапазоне более длинных (или более коротких) волн.

Отметим, что мощность, расходуемая при этом образцом на усиление (или генерацию), вводится в него за счет энергии высокочастотного поля, в котором осуществляется импульсная инверсия.

Созданные в настоящее время малошумящие парамагнитные усилители построены на основе метода получения неравновесных состояний, описанного Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в 1955 г. Этот способ основан на одновременном использовании трех квантовых уровней и вспомогательного высокочастотного электромагнитного поля.

Идея этого метода чрезвычайно проста. Пусть в рассматриваемой системе имеется три энергетических уровня, так что энергия третьего больше, чем энергия второго, а второго больше, чем первого. Тогда в равновесном со-

стоянии на третьем уровне будет меньше частиц, чем на втором, а на втором меньше, чем на первом.

Если температура образца достаточно низка, то в силу известного нам распределения Больцмана различие в числах частиц на этих уровнях может быть достаточно большим (рис. 15). Можно создать, например, такие условия, при которых на верхнем уровне на 20%, а на среднем на 5% частиц меньше, чем на нижнем уровне. Это значит, что при прохождении через это вещество электромагнитной волны, кванты которой соответствуют разности энергий между любыми из этих трех уровней, будет наблюдаться ослабление волны — поглощение ее энергии.

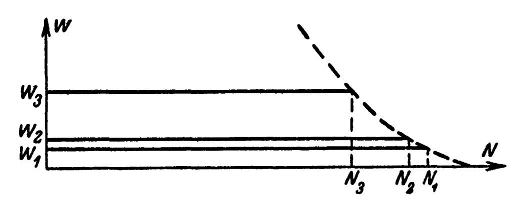


Рис. 15. Система с тремя квантовыми уровнями в состоянии термодинамического равновесия.

Направим теперь в эту среду волну такой частоты, чтобы ее кванты вызывали переход частиц с первого уровня на третий. Если мощность этой волны достаточно велика, то переходы с нижнего уровня на верхний будут происходить так интенсивно, что число частиц на верхнем и нижнем уровнях окажется практически одинаковым.

Это значит, что на нижнем уровне станет на 10% частиц меньше, чем было первоначально (а на верхнем на столько же больше). Но, следовательно, теперь равновесие окажется нарушенным: на среднем уровне будет на 5% частиц больше, чем на нижнем (рис. 16).

Что же произойдет, если теперь направить в эту среду электромагнитную волну такой частоты, чтобы кванты ее соответствовали переходу со второго уровня на первый. В этом случае взаимодействие волны с образцом приведет не к ослаблению, а к усилению волны за счет избыточной энергии образца. Очевидно, что при этом избыточная энергия вводится в образец вспомогательной электромагнитной волной, вызывающей переход частиц с нижнего уровня на верхний.

Теория усилителя сантиметровых волн, использующего метод возбуждения, предложенный Басовым и Прохоро-

вым, а в качестве рабочего вещества парамагнитный кристалл, разработана американским ученым Н. Бломбергеном, а действующий усилитель впервые создан Г. Сковилом с сотрудниками.

Для того чтобы количество молекул, находящихся на различных энергетических уровнях, было в надлежащем соотношении, такие усилители должны работать при температурах, близких к абсолютному нулю. Столь низкая температура необходима и для уменьшения тепловых колебаний кристаллической решетки, затрудняющих приве-

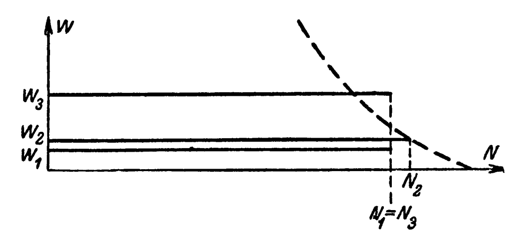


Рис. 16. Система с тремя квантовыми уровнями при насыщении перехода (1 → 3).

дение образца в активное состояние и приводящих к восстановлению термодинамического равновесия. При низких температурах можно нарушить тепловое равновесие и уравнять число частиц на первом и третьем уровне при сравнительно небольшой мощности вспомогательного электромагнитного излучения. Чем выше температура, тем больше должна быть энергия вспомогательной волны.

Основным преимуществом молекулярного усилителя перед усилителями, использующими электронные лампы, является крайне малый уровень внутренних шумов. Шумы электронных ламп обусловлены тем, что в них усиление осуществляется за счет кинетической энергии электронов, летящих в лампе. Но так как электроны вылетают из катода хаотически по законам случая, то число их, участвующее в каждый момент в процессе усиления, хаотически изменяется. Поэтому подвержена случайным изменениям и энергия, отдаваемая электронной лампой в нагрузку, что проявляется в виде колебаний величины усиленного сигнала. Если к выходу усилителя включен громкоговоритель, то эти случайные колебания выходного напряжения проявляются в виде неустранимых шумов, на фоне которых невозможно различить слабый сигнал.

В молекулярных генераторах используется не кинети-

ческая энергия молекул, а их внутренняя энергия, причем порции — кванты, отдаваемые волне одной молекулой, в тысячи раз меньше энергии, отдаваемой нагрузке отдельным электроном. Это же относится и к энергиям парамагнитных ионов, применяемых в усилителе.

Работа при температуре, близкой к абсолютному нулю, обеспечивает крайне низкий уровень тепловых шумов парамагнитных усилителей. Теоретически шумы этих усилителей должны быть в сотни раз меньшими, чем шумы лучших электронных ламп, работающих в сантиметровом диапазоне. Это уже подтверждено измерениями.

Как же устроен современный малошумящий парамагнитный усилитель?

Образец парамагнитного кристалла помещается внутрь объемного резонатора, сконструированного так, что он способен одновременно резонировать на две частоты. Более высокая частота соответствует возбуждающему излучению, уравнивающему число частиц на первом и третьем уровне. Более низкая частота, соответствующая разности энергий среднего и нижнего уровней, будет усиливаться.

Резонатор погружается в сосуд с жидким гелием, который, в свою очередь, помещен в сосуд с жидким азотом (жидкий азот нужен для уменьшения расхода жидкого гелия). Вся эта система помещена в зазоре между полюсами большого магнита (рис. 17). Величина магнитного поля должна быть такой, чтобы разность среднего и нижнего уровней энергии парамагнитных ионов в этом поле соответствовала квантам усиливаемой радиоволны.

Изменяя величину магнитного поля, можно в широких пределах перестраивать рабочую частоту усилителя. Полоса усиливаемых частот определяется для каждого вещества главным образом коэффициентом усиления и качеством применяемого резонатора. Причина здесь та же, что и в усилителе с молекулярным пучком аммиака. Парамагнитный усилитель является усилителем регенеративного типа, так что по мере увеличения коэффициента усиления и приближения к порогу самовозбуждения полоса усиливаемых им частот сужается.

Итак, парамагнитный усилитель обладает крайне малыми внутренними шумами, поэтому, включив его на вход радиоприемника, можно существенно повысить чувствительность приемника к слабым сигналам. Но при этом обнаруживаются трудности, неожиданные для людей, привыкших к ламповым усилителям.

Дело в том, что в электронных лампах четко разделяются входные и выходные цепи. Цепь сетки управляет анодной цепью. Обратная реакция анодной цепи на сеточную мала. Поэтому в обычных ламповых усилителях сеточные цепи являются входными, а анодные — выходными. Всякая связь между ними (помимо лампы) является паразитной и может быть сделана достаточно слабой. При введении в такой усилитель положительной обратной связи положение меняется. В этом случае различие между входными и выходными цепями стирается. Усилитель реагирует на сигналы, подведенные к выходым зажимам почти так же, как и к входным Это не удивительно, так как резонансный усилитель с положительной обратной связью — это, по существу, резонансный контур, часть потерь которого скомпенсирована за счет энергии, поступающей из цепи обратной связи.

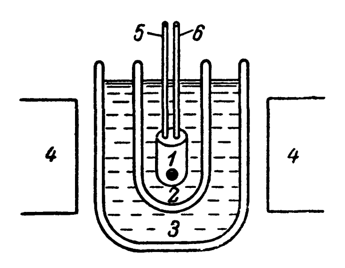


Рис. 17. Устройство парамагнитного усилителя.

1 — объемный резонатор с парамагнитным образцом; *2* — сосуд Дюара с жидким гелием; *3* — сосуд Дюара с жидким азотом; *4* — полюсы магнита; *5* — ввод возбуждающего поля; *6* — ввод усиливаемого сигнала

Парамагнитный усилитель, являющийся, по существу, регенеративным усилителем, тоже не имеет отдельно входа и выхода. Даже если объемный резонатор усилителя имеет два отверстия связи, соединяющие его с двумя волноводами, мы не можем утверждать, что один из них входной, а другой выходной; они неразличимы.

Предположим, что мы включили парамагнитный усилитель при помощи одного из волноводов к антенне, а при помощи второго — ко входу обычного лампового приемника СВЧ. Можно было бы думать, что слабый сигнал (пришедший из антенны), который раньше терялся в шумах приемника, теперь будет усилен и станет значительно больше этих шумов. Но дело обстоит не так просто. Шумы входных цепей приемника тоже попадут через второй волновод в усилитель и будут усилены им так же, как и сигнал, пришедший по первому волноводу из антенны. Эти усиленные шумы возвратятся к входу приемника Но так как они будут усилены настолько же, насколько и принимаемый сигнал, то отношение сигнала к шуму не улучшится — чувствительность приемника не увеличится.

Для того чтобы использовать возможности парамагнитного усилителя, необходимо воспрепятствовать попаданию в него шумов входных цепей приемника. Но так как сам усилитель не обладает однонаправленным действием, то соответствующая развязка должна быть обеспечена во внешних цепях. Это может быть осуществлено при помощи ферритовых развязок — элементов, пропускающих электромагнитные волны только в одну сторону. Включив ее так, чтобы усиленный сигнал мог проходить к приемнику, а шумы его входных цепей не попадали в усилитель, можно полностью использовать возможности такого усилителя.

Но если в парамагнитном усилителе выход ничем не отличается от входа, то нельзя ли обойтись одним отверстием связи и одним волноводом? Эта с первого взгляда фантастическая идея может быть реализована при помощи замечательного ферритового устройства, обычно называемого циркулятором. Циркулятор представляет собой мостиковую схему, имеющую четыре эквивалентных конца. Однако наличие феррита делает эту схему невзаимной, т. е. электромагнитные волны в ней под влиянием феррита распространяются лишь вполне определенным образом. Включив к одному из концов циркулятора поглотитель и подобрав подходящим образом свойства феррита, можно сделать так, чтобы сигнал от второго конца шел только к третьему, от третьего только к четвертому, а от четвертого только к первому.

Таким образом, если циркулятор, к первому концу которого включен охлажденный поглотитель, включить вторым концом к антенне, третьим к усилителю и четвертым к приемнику, то сигнал от антенны попадет в усилитель, а от него в приемник, в то время как шумы входных цепей приемника, не попадая в усилитель, будут передаваться только в поглотитель. Так применение новых магнитных материалов дает возможность полностью реализовать высокую чувствительность, свойственную квантовым усилителям.

Конструктивно современный парамагнитный усилитель представляет сравнительно компактный прибор. Применение магнитных сплавов позволяет получить нужное магнитное поле при небольших размерах магнита. Для насыщения вспомогательного квантового перехода достаточно мощности обычного отражательного клистрона. Наиболее сложным является обеспечение низкой температуры, необходимой для работы усилителя. Однако современная

криогенная техника позволяет создать установку, в которой температура ниже четырех градусов Кельвина поддерживается в течение длительного времени, причем размеры всего устройства близки к размеру комнатного холодильника. Если же установка должна непрерывно работать лишь несколько часов, то ее размеры будут существенно меньшими. Не исключено, что будут построены квантовые усилители, работающие при более высоких температурах.

При достижении порога самовозбуждения парамагнитный усилитель превращается в генератор. Однако этот генератор не обладает преимуществами генератора на пучке молекул аммиака. Частота генерируемых им радиоволн сильно зависит от величины магнитного поля и температуры, поэтому он не достаточно стабилен.

Применение квантово-механических систем с тремя энергетическими уровнями позволяет создать не только парамагнитные усилители, описанные выше, но некоторые другие устройства, например молекулярный генератор, работающий не на молекулярном пучке, а на газе. При этом можно, например, использовать для возбуждения вращательные переходы молекулы аммиака и применять в качестве рабочих частоты, соответствующие известным нам инверсионным переходам. Так как рабочее вещество в этом варианте находится в газообразном состоянии, а не в виде молекулярного пучка, то на этой основе может быть построен прибор, не нуждающийся в непрерывной откачке. Подобно обычной радиолампе он может быть откачан до необходимого разрежения и отпаян от вакуумной установки. Несмотря на то, что стабильность такого отпаянного молекулярного генератора меньше, чем у генератора с молекулярным пучком, он в ряде случаев может оказаться более удобным.

Не исключена также возможность применения в качестве возбуждающего электромагнитного поля спектральных линий излучения других диапазонов, например оптического.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

Человек, сидящий в санях, не может сдвинуть их с места, не опершись о землю. Общий закон механики говорит, что внутренние силы, действующие в какой-либо системе, не способны сместить ее центр тяжести.

Каждый читающий эти строки, несомненно, качался на качелях и знает, что их можно раскачать и не прикасаясь к неподвижным предметам. Однако это, конечно, не противоречит закону, упомянутому выше, ибо смещение центра тяжести качелей компенсируется незаметным смещением центра тяжести земли. Процесс раскачивания качелей состоит именно в том, что, опираясь через подвесы о землю, человек, сгибая и выпрямляя колени, регулярно поднимает и опускает свой центр тяжести. Если это производится в такт, то нетрудно раскачать качели очень сильно.

Этот способ возбуждения колебаний называется параметрическим возбуждением, ибо здесь меняется параметр — длина подвеса, т. е. момент инерции системы. Для того чтобы возникли колебания, нужно изменять этот параметр, т. е. приседать и распрямляться, достаточно энергично, причем примерно вдвое чаще, чем частота свободных колебаний качелей.

Явление параметрического возбуждения колебаний знакомо физикам, начиная с середины прошлого века (Мелде 1859). Затем его исследовал английский физик Релей, а позже в годы, предшествующие первой мировой войне, тогда еще молодой индийский физик Ч. В. Раман.

Параметрическое возбуждение электрических колебаний стало предметом подробного изучения только в двадцатых годах в работе К. Хегнера, а затем в исследованиях школы Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. Математические исследования А. А. Андронова и М. А. Леонтовича положили начало работам, приведшим к созданию параметрических машин Мандельштама и Папалекси.

Возможность осуществления параметрического возбуждения в сверхвысокочастотном диапазоне при помощи ферритов была впервые указана А. Л. Микаэльяном. В последнее время работы американского ученого Г. Сула вновь привлекли внимание к этому кругу вопросов. Рассмотрев современными методами процессы, происходящие в ферритах под воздействием высокочастотных электромагнитных полей, он показал, что этим путем можно обеспечить возбуждение электромагнитных колебаний в сантиметровом диапазоне. Импульсный генератор и усилитель этого типа были вскоре описаны М. Вейсом.

Можно представить себе действие подобных приборов, воспользовавшись глубокой аналогией с процессом раскачивания качелей. Если в резонаторе имеется кусок монокристалла феррита, то магнитная энергия, заключенная

в резонаторе, зависит от намагниченности феррита. Можно сказать, что намагниченность феррита определяет индуктивность системы. При действии электромагнитного поля намагниченность феррита будет изменяться в такт с полем. Это значит, что в такт с полем будет изменяться и индуктивность, а следовательно, энергия резонатора. Если намагниченность феррита изменяется под влиянием поля достаточно сильно (достаточно большая глубина модуляции параметра), то в резонаторе возбудятся колебания с частотой, вдвое меньшей, чем частота приложенного высокочастотного поля. Для того чтобы такие колебания возникли, необходимо, чтобы энергия, вносимая в резонатор возбуждающим полем, превосходила потери энергии.

Если вносимая энергия не достигает этой величины, то параметрическое возбуждение не возникнет, но система будет регенерирована. Это значит, что эффективная добротность резонатора на его резонансной частоте увеличится тем сильнее, чем ближе система к порогу возбуждения.

Нетрудно обнаружить аналогию и с парамагнитным усилителем с тремя уровнями. Здесь регенерация тоже осуществляется за счет энергии, вносимой в резонатор электромагнитной волной, частота которой отличается от рабочей частоты усилителя. Если в системе с тремя уровнями средний уровень находится точно посредине между двумя крайними, то аналогия становится очевидной.

Предполагается, что параметрические усилители на ферритах тоже будут обладать малыми шумами, не требуя при этом применения жидкого гелия. Однако это еще не подтверждено экспериментом.

БУДУЩЕЕ КВАНТОВОЙ РАДИОТЕХНИКИ

Явления и приборы, описанные выше, лежат в основе и являются первыми плодами новой науки—квантовой радиофизики. Эта область, возникшая первоначально в виде радиоспектроскопии, явилась следствием смыкания методов квантовой механики и квантовой электродинамики с методами и задачами радиотехники. Сейчас новая область физики открывает широкие возможности перед радиотехникой и рядом таких ее важнейших ветвей, как радионавигация, радиолокация, радиосвязь и радиотелеуправление, перед новыми научными направлениями — радиоастрономией, радиоспектроскопией и радиометеорологией.

Молекулярный генератор, работающий на пучке моле-

кул аммиака, представляет собой, как мы знаем, весьма простое устройство объемом в несколько литров. Но этот генератор, обладая рекордной стабильностью, не может все же быть непосредственно применен в радиотехнических устройствах. Причиной этого является весьма малая мощность генератора, не превышающая миллиардных долей ватта. Ограничивает возможность непосредственного применения молекулярного генератора и то, что он работает в диапазоне 1,25 *см,* не имеющем широкого применения.

Важнейшей задачей, стоящей перед радиоинженерами, является получение при помощи молекулярных генераторов достаточно мощных колебаний в различных диапазонах волн при сохранении их стабильности.

Простейшим путем является применение высокочастотных кварцевых генераторов, частота которых периодически сверяется с сигналом молекулярного генератора. Такая система, позволяющая в течение нескольких секунд измерять частоту мегагерцового кварцевого генератора с точностью до одиннадцати значащих цифр, разработана в Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР, о чем было доложено в сентябре 1957 г. на Всесоюзной конференции по радиоэлектронике в Саратове. В этой системе используются биения сигнала молекулярного генератора и гармоники измеряемого кварцевого генератора. Выходной сигнал может быть использован для автоматической подстройки частоты кварцевого генератора. Наиболее сложным вопросом при реализации подобных систем является устранение фазовых нестабильностей в цепях умножения частоты и схеме регулирования, а также уменьшение влияния внутренних шумов схемы.

Вторым вариантом этой схемы является устройство, в котором вместо автоматической подстройки частоты кварцевого генератора применяется схема вычитания, при помощи которой ошибка частоты кварцевого генератора вычитается из его сигнала. Такая система, по существу, эквивалентна схеме деления частоты молекулярного генератора на большое целое число. Поэтому для получения круглого значения стабильной частоты необходимо ввести еще специальные устройства преобразования.

Большой интерес представляет осуществленная в июне 1957 г. в Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР схема фазовой стабилизации отражательного клистрона по молекулярному генератору. В это же время подобная схема была независимо разработана в Калифор-

нийском технологическом институте. Такие схемы, по существу, дают увеличение мощности молекулярного генератора в десятки миллионов раз при сохранении присущей ему стабильности частоты. Если клистрон работает в более низкочастотном диапазоне, чем молекулярный генератор, то в схеме фазовой стабилизации применяется умножение частоты клистрона. С сигналом молекулярного генератора сравнивается гармоника клистрона, так что и здесь схема, по существу, эквивалентна схеме деления частоты молекулярного генератора.

Нетрудно видеть, что последовательным делением частоты сигнала молекулярного генератора можно получить достаточно низкую частоту, пригодную для вращения синхронного мотора, что позволяет построить молекулярные часы, превосходящие по точности все известные в настоящее время устройства для измерения времени.

Малошумящие квантовые усилители должны существенно повысить чувствительность радиоприемников сверхвысоких частот, а это позволит увеличить в несколько раз дальность действия радиолокаторов, увеличить чувствительность радиотелескопов и эффективно использовать рассеяние радиоволн в тропосфере для дальней радиосвязи.

Известно, что при радиоастрономических исследованиях приходится изучать чрезвычайно слабые электромагнитные излучения небесных объектов. Эти излучения имеют флуктуационный характер. Если учесть, что интенсивность их столь мала, что возбуждаемые ими напряжения на входе приемника обычно много ниже уровня его внутренних шумов, то становится ясно, сколь трудна задача, стоящая перед радиоастрономами.

Для того чтобы выделить напряжения, возбуждаемые излучаемым объектом из шумов приемника, в настоящее время применяются два основных метода. Оба они основаны на том, что шумы приемника по своей природе стационарны.

Первый метод — метод компенсации, как показывает его название, состоит в том, что напряжение, образуемое на выходе приемника его собственными шумами, компенсируется при помощи вспомогательной батареи так, что при отсутствии исследуемого излучения выходной сигнал весьма близок к нулю.

Второй метод, называемый методом модуляционного радиометра, заключается в том, что электромагнитные волны, приходящие от космических объектов, подвергают-

ся периодической модуляции во входных цепях приемного устройства. После усиления модулированный сигнал пропускается через узкополосный фильтр, настроенный на частоту модуляции. Обычно в радиометре для увеличения отношения сигнала к шуму применяется и синхронное детектирование. Собственные шумы приемника, не испытавшие модуляции, сильно ослабляются этими фильтрами, что дает возможность регистрировать слабые космические излучения, возбуждающие на входе приемника напряжения, лежащие много ниже уровня его шумов.

Оба эти метода, однако, обладают существенными недостатками, от которых свободно устройство, обладающее низкими собственными шумами. Таким устройством является радиотелескоп, к антенне которого присоединен парамагнитный усилитель. Так как шумы таких усилителей в сотни раз меньше шумов электронных ламп, то радиоастрономы смогут изучать более слабые или более удаленные объекты и исследовать их точнее, чем теперь.

Еще более важно применение малошумящих парамагнитных усилителей в тропосферных линиях связи. Этот новый вид связи основан на использовании стационарных неоднородностей, существующих в тропосфере. Такие неоднородности являются следствием хаотических вихревых движений воздуха и приводят к хаотическим изменениям его плотности, а следовательно, и диэлектрической постоянной. При распространении радиоволн, длина которых меньше средних размеров вихрей, наблюдается рассеяние радиоволн, подобное рассеянию света в неоднородной среде. Так, мы видим со стороны столб света прожектора.

Относительная доля электромагнитной энергии, рассеиваемой в стороны, в этих условиях очень мала. Еще меньше часть энергии, попадающая в антенну приемника. Однако методы радиоастрономии здесь неприменимы, так как передаваемый сигнал должен пройти тракт с наименьшими искажениями без потери содержащейся в нем информации. Вместе с тем шумы широкополосных приемников, необходимых для неискаженной передачи этих сигналов, при применении электронных ламп оказываются очень большими. Поэтому здесь особенно эффективно применение широкополосных парамагнитных усилителей. Они позволяют существенно повысить дальность линий тропосферной связи или уменьшить необходимую мощность передатчиков.

Квантовая радиофизика позволит эффективно пере-

бросить мост между диапазоном миллиметровых радиоволн и областью инфракрасных лучей. Уже сейчас радиоспектроскопические исследования ведутся на волнах короче одного миллиметра.

Нет сомнения, что недалеко время, когда в субмиллиметровом диапазоне будут действовать молекулярные генераторы монохроматических колебаний и молекулярные усилители. Возможно что при этом первым будет применено классическое вещество радиоспектроскопии—аммиак.

Может показаться, что молекулярные генераторы с их ничтожной мощностью не могут соперничать с существующими источниками инфракрасного излучения. Но это мнение ошибочно. Известные нам мощные источники инфракрасных лучей излучают практически сплошной спектр, и, несмотря на большую полную энергию излучения, энергия, приходящаяся на узкий интервал частот, оказывается весьма малой, гораздо меньшей, чем у молекулярных генераторов сантиметрового диапазона.

Для оценки достаточно сказать, что световая температура источника инфракрасных лучей редко превосходит несколько тысяч градусов. Соответствующая «температура» молекулярного генератора, излучающего всю свою энергию в чрезвычайно узком интервале частот, соответствует сотням тысяч градусов.

Использование нелинейной зависимости коэффициента поглощения от падающей мощности позволяет надеяться на возможность преобразования частоты (гетеродинирования) в инфракрасной области, что приведет к совершенно новым возможностям в этой интересной области.

Объем брошюры не позволяет нам остановиться на таких интересных вопросах, как возможность экспериментальной проверки общей теории относительности в лабораторных условиях при помощи молекулярного генератора.

Мы не смогли рассказать здесь о новом методе измерения скорости света путем сопоставления длины волны и частоты одного и того же молекулярного генератора и связанной с этим возможностью построения новой системы мер, о новых эталонах частоты с пучками атомов цезия, которые оказались серьезными соперниками молекулярных генераторов. Не рассказали мы и о других научных и технических перспективах, открываемых квантовой радиофизикой. Несомненно, что многое из этого вскоре станет реальным и общедоступным.

Цена 1 р. 10 к.